

# 阿蘇中央火口丘における自然電位（1）

田中良和・橋本武志・長谷英彰・坂中伸也・増田秀晴

京都大学理学研究科 地球熱学研究施設火山研究センター

## 1. はじめに

地下で水が流動すると、流れに沿って正の電荷が搬ばれる。結果として、地表面に電位を発生させる。この原理に基づいて、地表の電位分布から地下水や熱水流動を探ろうとする試みは、多くの火山や地熱地域で実施されている。北海道大学の西田らは雌阿寒、有珠、恵山、三宅島火山などの火山での自然電位（SP）観測を意欲的に行い、多くの活火山の火口（噴気）を中心として正の電位異常の存在することを明らかにし、これらの正の電位異常は火口への熱水の上昇に伴うものである事を示し、電位の強さや広がりから、火山活動を診断しうることを示した。石戸らは流動電位についての考察を行い、多くの自然電位はこの現象で説明できることを示した。また、伊豆大島での観測から火口下における電流の強さを推定したり、地熱発電に伴う生産井と還元井の地電位に及ぼす影響などを明らかにしている。橋本らは雲仙火山における平成新山形成に伴う自然電位の発達過程を明らかにした。近年、安川らは九重火山の涌蓋山西部の地熱地域で自然電位の観測を行い深部の地下の等温熱源に地形形態から推定される地下水流動およびELF帯MTによる電気伝導度分布を用いたシミュレーションをおこない観測値を説明できる熱水流動の概要を求めている。このように自然電位の観測は火山や地熱地域における地下の熱水活動を把握する上で極めて重要である。にもかかわらず、筆者らにとって極めて身近である阿蘇火山において自然電位の観測がほとんどなされていないので、遅ればせながら、阿蘇の中央火口丘を対象として調査を行うことにした。

阿蘇火山における自然電位の研究の歴史は古く、南葉に遡る。彼は阿蘇の米塚、別府の扇山などで自然電位の観測を行い、多くの山で負の電位が観測され、圧力勾配に起因する地形効果であることを明らかにした。然らば、噴火に伴う圧力変化を地電位で捉え得るとの発想から、噴火活動中の阿蘇中岳火口の急崖部で鉛直地電位変化を観測したり、阿蘇のカルデラ地域で自然電位の勾配測定を実施し、カルデラや断層構造を論じている。しかし、その後の阿蘇における地電位の研究は見あたらず、わずかに1989年—90年の阿蘇火山の活動時期に橋本らが中岳火口近傍でのSP観測を行ったにとどまる。近年では三宅島で典型的な活火山におけるSPの様相が明らかにされてきた。つまり、活火山においては南葉の指摘したように、基本的には山頂に向けての地形効果としての負異常が存在するが、これに地下深部から火口に向けての熱水流動に伴う正の電位異常が加わっているものであることが明瞭になりつつある。

## 2. 阿蘇火山の概要

阿蘇の中央火口丘は東西17 km、南北25 kmの阿蘇カルデラの中央に位置し、8.9万年前に生じたとされるASO4火砕流以後に形成されたものである。多くの火口丘群によって構成されていて、それらの主要な火口丘については小野・渡辺らによって調査され、火山土地条件図（国土地理院発行）に概要が記載されていて、中岳の火山活動のみならず、米塚・往生・杵島・上米塚・赤水溶岩流などの火山活動は6300年前のアカホヤ火山灰以後である。図1に阿蘇の中央火口丘の全容を示す。国土地理院5万分1集成図「阿蘇・九重」を縮小したものである。東部に根子岳があり、最高峰の高岳の西に隣接して活動火口を有する中岳、これを取り巻くように丸山、皿山、御竈門山、夜峰山、烏帽子岳、杵島岳、往生岳、楯尾岳など東西約14 km、南北約8 kmの山体で構成される。カルデラの標高は430 m程度であり最高峰の高岳は1592 mで、比高は1000 mをこえる。観光開発が進んでいて、標高1250 mの中岳火口近くにまで自動車を用いて行くことが可能である。また、海拔1000 mを超える地域は裸地が多く、すそ野の地域は原野として採草地や牧野として利用されているため、浸食崖さえ気に

しなければ任意の地点を踏査できる利点がある。この報告では、第一報として1998年夏に京都大学理学部の地球電磁気学の3回生を対象とした課題演習として、数名の学生と共に実施した自然電位観測を整理したものである。概要が把握できていない上に、実習を主眼としたものであったため、いくつかの不都合な点が見出されるが、今後の再測定などで修正を行う所存である。

### 3. 観測の方法

地電位の観測は、地表の2地点に電極を設置して電位差を測定し、これを反復して必要な空間の電位関係を求めることで達成される。ただ通常の電子テスター（入力抵抗は10Mオーム程度）を電圧計として用いて、プローブを地面に突き刺す方法では、イオン化された地面の水と金属プローブの相互作用で不安定なイオンシースを生じて正確な電位差が測定できない。これを回避するため、大地への接触は銅-硫酸銅や鉛-塩化鉛電極などが用いられる。電極の種類が異なると固有の電位差を生じるので、その差異を求める必要のあることは言うまでもない。

基準とすべき電極を深さ20cm程度に埋設して、必要な地点にまで絶縁された電線を延長して測定を行うことが望ましい。このような方式を固定電極方式と呼ぶ。電線の重量や回収作業の能率などを勘案して、その長さは500m~5km程度に決定される。隣接する固定電極間の電位の接続は単純な加算であるが、誤差の累積には十分な注意を払う必要がある。即ち、接続時点で場に時間変化があってはならないし、電極間のわずかな電位の食い違いが生じないように基準電極は同一の電極を用いるように心がける必要がある。また、電極の温度変化などにも留意することが必要である。出来れば測定領域をループで閉じ、閉塞誤差を確認する必要がある。

他方、尺取り虫方式と称せられる方法も適用できる。これは50m長さ程度の電線と2つの電極を準備し、50m区間の測定の後、前方の電極はそのままにして、後方の電極を取り外し次の地点に電線を引きずりながら移動する。作業能率は高く見えるが、区間毎の測定誤差が蓄積される危険性がある。測線を閉塞させ閉塞誤差を検討しないと信頼できる値は得られない。電極の設置は表土をはぎ、裸地に行うから、裸地の電位安定に若干の時間を要する。表土に礫やスコリアの多い場合には大地との接触が悪くなるので導電性を持たせたスポンジやベントナイトなどを敷き込む必要がある。

今回の調査は概査を主目的としたため、多くの部分で50m長の尺取り虫方式がとられた。測線は閉塞していないので信頼度は低い。また、断線事故を認識しやすくする目的で、銅-硫酸銅と鉛-塩化鉛という異種の電極を用いた。観測地点の位置の同定は国土地理院2.5万分1地形図に対比させて決定した。

固定電極方式で長測線を実施する場合、使用する電線にも依存するが多くの場合、重くなる。フランスのチームは極めて細いエナメル線を用いて、一気に10km程の測線をこなしている。位置決定にはエナメル線に並行して木綿糸を繰り出し、その繰り出し長さを測定する方法を用いていた。我々は糸方式の距離計を持たないので、位置は地図で決定することとして、高岳ルートにこの方法を適用した。エナメル線は人が引っかけても怪我をしない程度に細い物が用いられるが、不幸にして人や動物が引っかけると簡単に切断され測定に支障をきたすので、状況を良く見極めて用いる必要がある。この電線は再使用しないので乱雑に回収できて軽いから作業性は極めて高い。諸氏の追使用をお勧めする。

また、固定電極方式では、固定電極の改埋回数が少ないので時間的にゆとりが出来、丁寧な設置を行うことになる。つまりベントナイトなどを敷き込み（フランスチームはスポンジを用いていた）温度変化をさけるために深く埋め込むことなどに注意が払える。状況により周辺の電磁環境にも注意を払う必要がある。九州地域では、VLF電波の送信所が加久藤にあり、この電界が強い。加えて熊本には送信出力500KWのNHK第2放送が存在し、電極間を接続するリード線がアンテナの機能をして測定値を乱す場合がある。このような場合には入力部にCR（10kオームと0.1uF）のフィルターを挿入することで解決できる。

#### 4. 測線について

阿蘇中岳は日本でも有数の活火山である。近年では1989-90年の噴火活動が顕著であるが、中岳火口には湯溜まりが形成されているものの、第一火口の南縁には活発な噴気が存在し続け、地下の熱活動は盛んであると考えられる。このような場合、中岳火口直下には熱水活動にともなうSP異常が期待されるので、砂千里火口の東部を基点として、南北に一つの測線を展開すると共に、西方は草千里を経て、湯ノ谷温泉に下り、火山研究所に至るルート、東側は砂千里から中岳南西稜を登はんして中岳山頂、高岳を経由して日の尾峠に下る測線を展開することとした(図1)。火口丘の基部は、これらの成果を見て、後日、国道等を利用して接続することとしたが、1999年2月の時点では閉塞できていない。

#### 5. 観測の結果

図2に南北測線(約14 km)での自然電位の測定結果を地形断面と共に示した。電位の基準は砂千里としている。図から直ちに三宅島火山で観測されたのと類似の、W字型のSP分布の存在が明らかである。即ち、山の裾の部分では高度を増すに従って電位は低くなる。しかし、この現象は、南側では中岳の3-4 km地点で、北側では5 km地点で消滅し、活動火口に近づくに従って電位の上昇に転じている。

一方、東西のSP分布は図3に示す如くである。電位の基準は図2と同じ砂千里としている。砂千里から東方にかけては極めて緩やかな電位の減少が観測されているが、西方には著しい電位の凹凸が見出される。中岳や高岳についての地形相関の電位変化は明瞭ではない。砂千里の8 km西方の湯ノ谷温泉を中心とする正の変化が顕著である。ここでも地形効果の影響は分かりにくい。草千里から砂千里までの地形は比較的なだらかであり、この地域には地表徴候としての熱水活動はない。これに対応して、SPは100 mV以内の変化に留まっている。しかし、草千里火口の西端部分から西方に幅約2 kmで300 mVに達する負の異常が見いだせる事や、砂千里から本堂に至る区間で-150 mV程度の電位の減少が観測されている。閉じた測線網での測定が終了していないことや、往復測定がなされていないことにより、誤差の評価をなしえないので、詳しい議論は今後の成果に待たねばならないが、以下に、これらの特徴的な電位異常についての考察を行い、今後の研究の指針とする。

#### 6. 得られた知見および議論

図2に示す南北の測線から推定する限り、阿蘇火山の電位分布は極めて明瞭で、典型的な熱水活動を伴う三宅島火山と類似の自然電位分布であると推察される。即ち、山の裾の部分では高度を増すに従って、自然電位は低くなる。このことは、雨水が高所から低所に流れることと整合的である。しかし、この現象は南側では中岳の3-4 km地点で、北側では5 km地点で消滅し、活動火口に近づくに従って電位の上昇に転じている。この上昇傾向は活火山に特有の現象と考えることが可能で、地下における熱水の上昇を強く示唆している。熱水活動に伴う流動電位の源が十分に深ければ、この正の異常域は緩やかに広がったものになろうし、浅ければ比較的狭い領域に観測できるであろうから、大まかにみて、電流源の深さは2-3 kmと推定できる。

一方、東西測線に見られた電位変化はやや複雑である。火口丘の東部、中岳山頂部や高岳にかけての電位変化は少なく、地形効果が明瞭ではない。地形効果は、雨水が大地に浸透して下方に流動することが前提であるが、これらの地域の地表には火山灰や火山砕屑物は少なく、非透水性の火山岩が露出した地形であることが影響しているのではないだろうか。地質、重力、電気抵抗、地震波による地下構造等を検討する必要がある。

湯ノ谷温泉を中心として正の電位異常が観測されている。このことは、地熱地域における自然電位分布としてはごく自然の現象で、これらの直下における熱水の上昇で説明される。乙ヶ瀬あたりにも小さな正異常が見られる。この現象も熱水の上昇域と見なすことは、近年のこの地域周囲での浅い温泉掘削が成功していることによっても支持される。

さて、草千里の西方や砂千里と本堂の間に見出される負の異常は何を意味するのであろうか。測定が尺取り虫方式でなされているので、誤差の累積が懸念された。このため、99年2月27日に砂千里～草千里までの区間を固定電極方式で再測定したが、主要な結果は変わらないことが確認できた。一般にSPの原因を流動電位に求めるなら、地形効果に逆らう負の異常は下向きの水の流動を示すことになる。両者に共通していることは、それぞれの負の異常が草千里火口や砂千里火口の西域の近傍に位置することであり、爆裂火口の構造と深く関わっていることを推定させる。今後、平面的な分布を詳しく調査し、これらの火口周辺の火山群の形成過程を加えて検討したい。

## 7. 終わりに

地表で測定されるSPは電流の発生源としての熱水上昇や、地下水の浸透のみならず、地下の電気抵抗構造に深く関わっている。地下の電気伝導度構造はいわゆるMT観測や電気探査により求めうる。このような努力はすでに、半田らによってなされている。特に、阿蘇では地形効果の良否が地下の流体運動を推定するうえでの鍵となるであろう。地形効果に関しては、古くは南葉が米塚、杵島、夜峰などで調査しているし、橋本は米塚において追試を行っている。これらの値が中央火口丘全体に適用しうるものとも考えにくいので、より多くの斜面での測定を行い、表層地質を十分に考察した上での、より一般化された地形電位勾配の研究が望まれる。上述の問題点の多くは、十分に密な2次元測定がなされれば解決できるであろうが、阿蘇中央火口丘と一口に言っても極めて広い。今後の測定は、おおまかに中央火口丘の全域を網羅しつつ、個々の特異な現象については、最大限に想像を逞しくして対象を絞り、精査を行う予定である。

## 8. 参考論文

- 南葉宗利、阿蘇旧火口原に於ける地電位分布、地球物理第3巻、昭和14年、12-16  
南葉宗利、火山山腹の上向地電位について、地球物理第3巻、昭和14年、129-141  
南葉宗利、阿蘇火山活動と鉛直地電位傾度変化との相関、地球物理第3巻、昭和14年、301-313  
安川香澄・茂木透、地下水流動に伴う自然電位異常に対する地形の効果—数値モデリングによるアプローチ—、物理探査、第51巻1号、17-26、1998  
安川香澄ほか、自然電位観測データに基づく涌蓋山付近の熱水流動系モデル、日本地熱学会誌、20、3、169-183、1998  
小野晃司・渡辺一徳、阿蘇火山地質図、地質調査所、1985  
橋本武志・田中良和・須藤靖明、火山地帯における自然電位観測—雲仙火山の場合—、防災研究所年報、37、b-1、183-191、1994  
Sasai Y. et al, Electromagnetic Monitoring of Miyake-jima Volcano, Izu-Bonin Arc, Japan: A Preliminary Report, J.Geomag. Geoelectr., 49, 1293-1316, 1997  
Fitterman D.V., Modeling of self-potential anomalies near vertical dikes, Geophysics, 48, 2, 171-180, 1983  
Matsushima N., et al., Self-potential studies in volcanic areas (2)-Usu, Hokkaido Komagatake and Meakan-, J.Fac. Science, Hokkaido Univ., Series 7, Vol. 8, no5, 465-477, 1990  
西田泰典、地球電磁気学的測定から推定される有珠山の地下構造、c a 1988年論文集、74-80、1988  
橋本武志、火山噴火に伴う自然電位変動、CA研究会1997年論文集、16-20、1997  
石戸経士、沸騰に伴う界面動電現象—地震の電磁気的前兆現象のメカニズム、CA研究会論文集、100-105、1995  
Hashimoto, T. and Y. Tanaka (1995) A large self-potential anomaly on Unzen volcano, Shimabara peninsula, Kyushu island, Japan, Geophys. Res. Lett., 22-3, p.191-194.  
Ishido, T. and T. Kikuchi (1987) The Self-Potential Method, Geothermal Energy, 12, 425-443.  
Ishido, T. and H. Mizutani (1981) Experimental and theoretical basis of electrokinetic phenomena in rock-water systems and its applications to geophysics: J. Geophys. Res., vol.86, p.1763-1775.  
Handa S., A. Suzuki and Y. Tanaka; The electrical resistivity structure of the Aso caldera, Japan. Bull. Volcanol. Soc. Japan, Vol.43, no1, 15-23, 1998



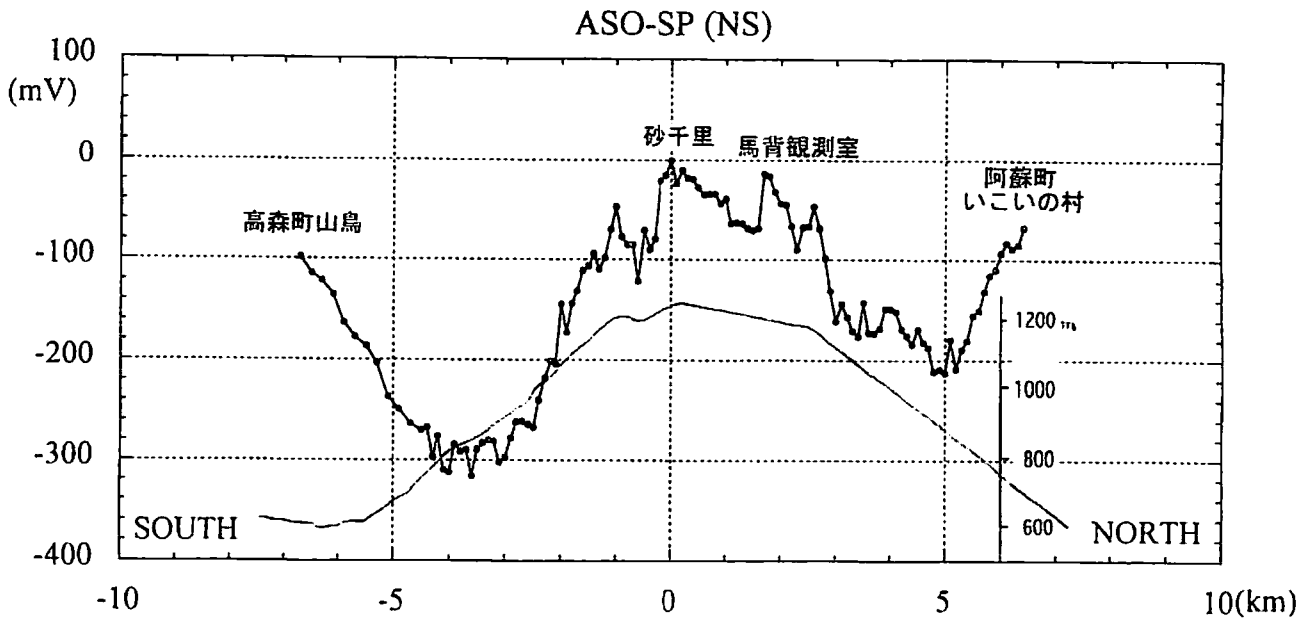


図2. 阿蘇中央火口丘の自然電位。南北断面図。実線は観測地点の標高。

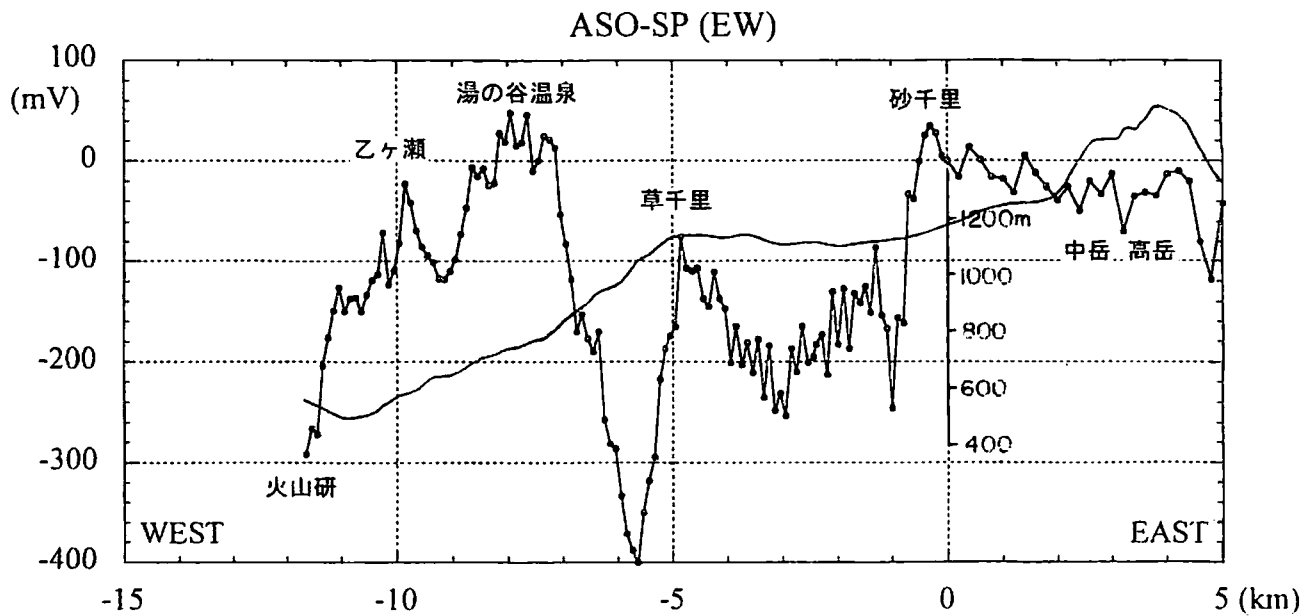


図3. 阿蘇中央火口丘の自然電位。東西断面図。実線は観測地点の標高。